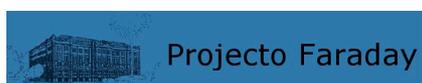


Projecto Faraday

Textos de Apoio

Calor e Trabalho

10º Ano de Escolaridade



casa das ciências

Porto, Outubro de 2009

Ficha Técnica

Projecto Faraday

Projecto de intervenção no ensino da Física no secundário.

Financiamento

Fundação Calouste Gulbenkian.

Execução

Departamento de Física, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

Escolas Participantes

- ES Filipa de Vilhena
- ES Fontes Pereira de Melo
- ES Garcia de Orta
- ES da Maia
- ES de Santa Maria da Feira

Coordenação

- J. M. B. Lopes dos Santos
- Manuel Joaquim Marques

Portal

URL: <http://www.fc.up.pt/faraday>

Texto do 10^o Ano

Redactor Principal

J. M. B. Lopes dos Santos

Colaboração e revisão

- Elisa Arieiro
- Carlos M. Carvalho
- Manuel Joaquim Marques

Actividades

Autores

- Carlos M. Carvalho
- Elisa Arieiro
- J. M. B. Lopes dos Santos
- Manuel Joaquim Marques
- Nuno Alexandre Vaz
- Nuno Nunes

Colaboração

- Joaquim Agostinho Moreira

Parte II

**ENERGIA, CALOR E
TEMPERATURA**

Conteúdo

Ficha Técnica	i
II ENERGIA, CALOR E TEMPERATURA	1
5 Calor e Trabalho	7
5.1 Trabalho em várias formas	7
5.1.1 Expansão e compressão de gases	8
5.1.2 Trabalho eléctrico	9
5.2 Efeito de Joule	13
5.2.1 O joule e a caloria	15
5.2.1.1 Experiência de Joule	16
5.3 Calor	17
5.4 Primeira lei da termodinâmica	19
5.5 Como é que a energia se transfere como calor? . . .	21
5.5.1 Condução	22
5.5.1.1 Condução numa janela	22
5.5.1.2 Isolamento térmico	23
5.5.2 Convecção	24
5.6 Actividades, Questões e Problemas	26
5.6.1 Actividades	26
5.6.2 Questões	26
5.6.3 Problemas	26

Lista de Figuras

5.1	Se o pistão se deslocar de Δx , o volume do gás varia de $\Delta V = A \times (x + \Delta x) - A \times x = A \times \Delta x$, em que A é a área da superfície do pistão.	8
5.2	Um circuito eléctrico com gerador, resistência e dois aparelhos de medida, amperímetro (A) e voltímetro (V); (a) representação semi-realista; (b) representação simbólica.	11
5.3	Resultados de uma experiência de aquecimento de uma mistura de água e gelo.	13
5.4	James Prescott Joule, (1818-1889). Físico inglês, nascido em Manchester, foi pupilo do químico John Dalton. A sua experiência de aquecimento de água com uma roda de pás accionada por pesos (aparelho à direita), foi um contributo fundamental para a clarificação do conceito de calor. Esta experiência permitiu-lhe determinar a relação entre caloria e a unidade de energia mecânica (que recebeu o seu nome), o joule . Joule descobriu também a expressão que exprime a energia dissipada numa resistência que escreveu na forma $P = RI^2$ (efeito de Joule). [2]	15
5.5	Um reprodução do caderno de notas de Joule com um esquema do seu aparelho (Manchester Museum of Science and Industry, UMIST collection).	16
5.6	Se A e B trocam calor, Q , e trabalho, W , apenas entre si, a energia do sistema S não varia.	20
5.7	No interior do vidro de uma janela, a temperatura varia entre o valor da temperatura interior, T_i , e exterior, T_e	22

Capítulo 5

Calor e Trabalho

Neste capítulo vamos olhar com mais pormenor para os diferentes modos como pode ocorrer a transferência de energia entre sistemas. Vamos ver que trabalho pode “disfarçar-se” de várias formas, menos evidentes do que as que considerámos até aqui. Mas discutiremos também algo que já mencionámos no início do Capítulo 2: há processos de transferência de energia que não são trabalho, em nenhum dos seus disfarces!

5.1 Trabalho em várias formas

Recordemos a noção de trabalho:

O trabalho de uma força de módulo constante, exercida sobre um corpo, num deslocamento de comprimento d , é o produto da componente da força segundo o deslocamento por d e é igual à variação de energia do sistema sobre o qual é exercida a força.

$$w = F_{\parallel} d = \Delta E$$

A variação de energia do sistema sobre o qual é realizado trabalho pode revestir diferentes aspectos:

- pode ser uma variação de energia cinética, como quando chutamos uma bola de futebol;

- pode ser uma variação de energia potencial, como quando uma grua eleva, sem a acelerar, uma carga;
- pode manifestar-se por uma variação de temperatura como na Actividade A9, em que aumentámos a temperatura da água agitando-a com uma varinha mágica.

Por vezes, há processos de transferência de energia que envolvem trabalho de uma forma menos evidente que os que estudámos no Capítulo 2. Vejamos alguns exemplos.

5.1.1 Expansão e compressão de gases

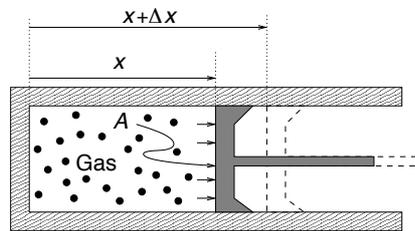


Figura 5.1: Se o pistão se deslocar de Δx , o volume do gás varia de $\Delta V = A \times (x + \Delta x) - A \times x = A \times \Delta x$, em que A é a área da superfície do pistão.

O primeiro exemplo é a expansão ou compressão de gases. Se designarmos por P a pressão de um gás no interior de um cilindro com um pistão móvel (como acontece num motor de combustão) a força sobre o pistão é, por definição de pressão,

$$F = P \times A$$

em que A é a área da superfície do pistão.

Se o pistão se deslocar no sentido das forças de pressão, o volume do gás aumenta. As forças de pressão do gás realizam trabalho positivo *sobre* o pistão. O trabalho de uma força é a variação de energia do sistema *sobre* o qual é exercida a força: a energia é transferida do gás para o pistão. Logo, a energia e a temperatura do gás diminuem.

Se o pistão se deslocar em oposição às forças de pressão, o volume de gás diminui e o trabalho realizado pelas forças de pressão é negativo. A energia é transferida do pistão para o gás. Neste caso a energia e a temperatura do gás aumentam.

Não é difícil relacionar o trabalho realizado pelo gás com a sua pressão e variação de volume. Se o pistão tiver um deslocamento Δx (eixo dos xx com a direcção e sentido das forças de pressão), o trabalho realizado pela forças de pressão do gás sobre o pistão será

$$w = F \times \Delta x = P \times A \times \Delta x.$$

Note-se que $A\Delta x = \Delta V$, a variação de volume do gás. Assim o trabalho realizado *pelo gás sobre o pistão* é:

$$w = P\Delta V. \quad (5.1)$$

Uma expansão corresponde a $\Delta x > 0$ e $\Delta V > 0$. Logo, $w > 0$: a energia é transferida do gás para o pistão. Numa compressão $\Delta x < 0$, $\Delta V < 0$ e $w < 0$: a energia do gás aumenta¹.

Quando enchemos um pneu de bicicleta, ou uma bola, com uma bomba manual, verificamos que esta aquece consideravelmente. Ao puxar o êmbolo para trás, entra ar no interior da bomba à pressão atmosférica. Para o introduzir na bola ou no pneu temos que o comprimir. A temperatura do gás aumenta. Após vários ciclos de compressão a temperatura das paredes da bomba acaba também por aumentar. No funcionamento de um frigorífico ocorrem também processos de compressão e expansão de gases.

▷ Caixa 5.1.

5.1.2 Trabalho eléctrico

A quase totalidade dos processos do nosso dia-a-dia em que há transferências de energia envolvem, de uma maneira ou de outra, correntes eléctricas. Ou seja, envolvem movimento de cargas eléctricas.

Recordemos como se calcula energia num circuito eléctrico. Tomemos o exemplo mais simples de um gerador ligado a uma resistência, como acontece, por exemplo, na maior parte dos aquecedores (ver Fig. 5.2).

Sabemos que existe, entre os dois extremos da resistência, uma diferença de potencial, V , (unidade, **volt**); que passa na resistência uma corrente eléctrica, I (unidade, **ampere**). Aprendemos, no 9^o ano, que a potência fornecida à resistência se podia calcular como:

$$P = VI. \quad (5.2)$$

¹Note-se que, à medida que o gás expande, a pressão diminui. Trata-se da situação em que a força varia no deslocamento, como discutimos na Actividade A6. Assim a expressão da Eq. 5.1 só é válida para variações de volume suficientemente pequenas para que se possa desprezar a variação de pressão.

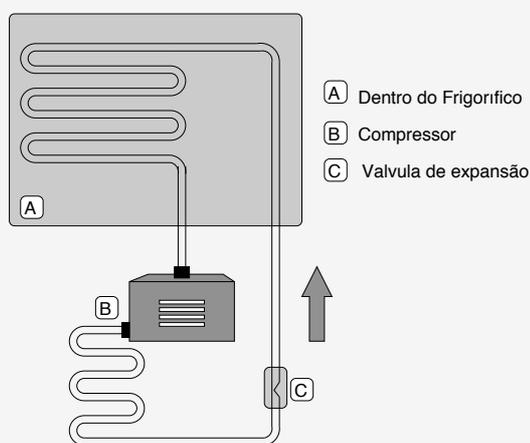
■ Como funciona um frigorífico. ■

O que se segue é uma explicação muito simplificada do funcionamento de um frigorífico.

Um frigorífico tem uma tubagem em circuito fechado no qual circula um gás. O “motor” do frigorífico é um compressor que aspira o gás que está na tubagem dentro da zona refrigerada e o comprime fortemente para uma serpentina que está no exterior, normalmente na parte de trás do aparelho. A compressão (trabalho realizado sobre o gás) aumenta muito a sua temperatura. Na serpentina arrefece em contacto com o ambiente (aquece a cozinha). Antes de entrar na válvula de compressão já está no estado líquido.

Na válvula, que funciona como um orifício muito estreito, o líquido passa de uma zona de alta pressão para uma de baixa pressão; o compressor está sempre a aspirar o gás que está na serpentina do interior do frigorífico. O líquido expande-se e passa ao estado gasoso, por causa da baixa pressão. O trabalho realizado na expansão e a energia necessária para a evaporação fazem baixar muito a temperatura do gás. Ao passar na serpentina no interior do frigorífico está a uma temperatura muito baixa, e consequentemente, mantém baixa a temperatura do interior do frigorífico.

Como vemos, o gás recebe energia do interior do frigorífico e passa-a para o ambiente na serpentina exterior. Este processo exige a realização de trabalho no compressor.



Esquema de funcionamento de um frigorífico

Caixa 5.1: O funcionamento de um frigorífico

Vamos discutir apenas o caso em que a corrente e a diferença de potencial (ddp) não variam no tempo; é o caso de uma pilha (pelo menos até esta descarregar), mas não o da corrente na tomadas de nossa casa. Na rede eléctrica a corrente varia no tempo, rapidamente, em ciclos que duram $0,02\text{ s}$ (50 ciclos por segundo).

Será que a expressão da Eq. 5.2 tem alguma coisa a ver com trabalho? Certamente, em Física tudo tem a ver com tudo.

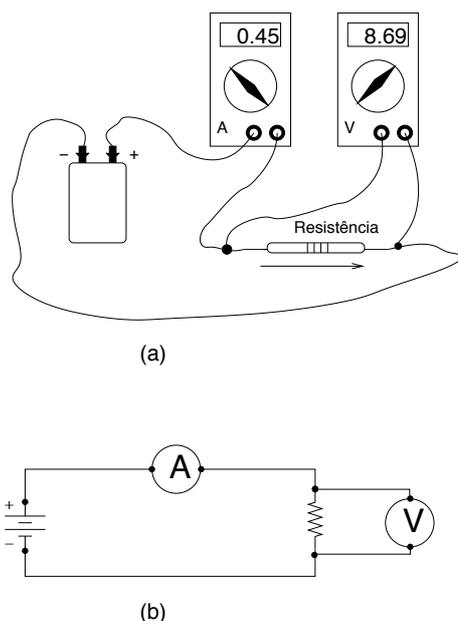


Figura 5.2: Um circuito eléctrico com gerador, resistência e dois aparelhos de medida, amperímetro (A) e voltímetro (V); (a) representação semi-realista; (b) representação simbólica.

O que é a corrente eléctrica?

▷ Actividade 5.1

Quando dizemos que na resistência passa uma corrente eléctrica estamos apenas a afirmar que há cargas eléctricas a passar de um extremo ao outro da resistência. Quando a corrente não varia, a quantidade de carga que passa num intervalo de tempo Δt é proporcional a Δt : a corrente é a constante de proporcionalidade. Sendo Q a carga que passa no circuito no intervalo Δt ,

$$Q = I\Delta t.$$

Exemplo: Numa lâmpada pode passar um corrente de cerca de $0,5\text{ A}$. Durante um minuto a carga transportada

por esta corrente é

$$Q = I\Delta t = 0,5 \times 60 = 30 \text{ C.}$$

A unidade de carga é o coulomb, abreviatura **C**. Para percebermos o que significa notemos que a carga do electrão (a partícula que se desloca nos circuitos eléctricos) é apenas de

$$e = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C.}$$

Assim uma corrente de 0,5 A, num minuto, corresponde à passagem de $30/1,6 \times 10^{-19} = 1,87 \times 10^{20}$ electrões.

Potência eléctrica

A presença do gerador no circuito da Fig. 5.2 origina forças eléctricas sobre as cargas. Tal como a força de atracção gravítica sobre um corpo é proporcional à sua massa, assim uma força eléctrica sobre uma carga q é proporcional ao valor da carga. Quando uma carga q se desloca de um extremo ao outro da resistência, as forças de natureza eléctrica realizam um trabalho também proporcional a q ,

$$w = qV.$$

A diferença de potencial é, precisamente, o trabalho por unidade de carga

$$V = w/q.$$

Se durante um intervalo Δt passar na resistência uma carga $Q = I\Delta t$, o trabalho total realizado pelas forças eléctricas do gerador é

$$W = QV = I\Delta t \times V = VI\Delta t.$$

A potência, definida por $W = P\Delta t$, é, então, dada pela Eq. 5.2. Agora compreendemos por que razão uma bateria não dura sempre. De cada vez que é ligada a um circuito, parte da sua energia é transferida para o mesmo.

Quase toda a nossa tecnologia é baseada em electricidade. Não é por isso surpreendente que seja particularmente fácil medir características de sinais eléctricos, como a corrente I ou a ddp, V . Medir a potência eléctrica fornecida a um circuito é, pois, uma operação muito simples. Mas, convém não esquecer, estamos na realidade a medir trabalho realizado por forças sobre cargas eléctricas.

5.2 Efeito de Joule

O que acontece à energia que um gerador eléctrico fornece às cargas de um circuito?

Quando a corrente eléctrica passa numa resistência, esta aquece. Uma analogia mecânica pode ajudar a compreender este fenómeno.

Imaginemos que queremos empurrar uma criança num carrossel giratório. Inicialmente o carrocél está parado. Empurrando-o, realizamos trabalho e a velocidade do carrossel aumenta: a sua energia cinética aumenta. Mas não por muito tempo. A partir de certo ponto temos que continuar a empurrar só para o manter em andamento com velocidade constante. Nessa fase de movimento estacionário, nenhuma da energia transferida pelo trabalho que realizámos resulta em energia cinética de movimento do carrossel: é toda dissipada e manifesta-se como aumento de temperatura dos rolamentos e do eixo do carrossel.

Num circuito eléctrico acontece algo semelhante. Na situação estacionária, corrente e ddp constantes, toda a energia resulta num aumento de temperatura das resistências do circuito.

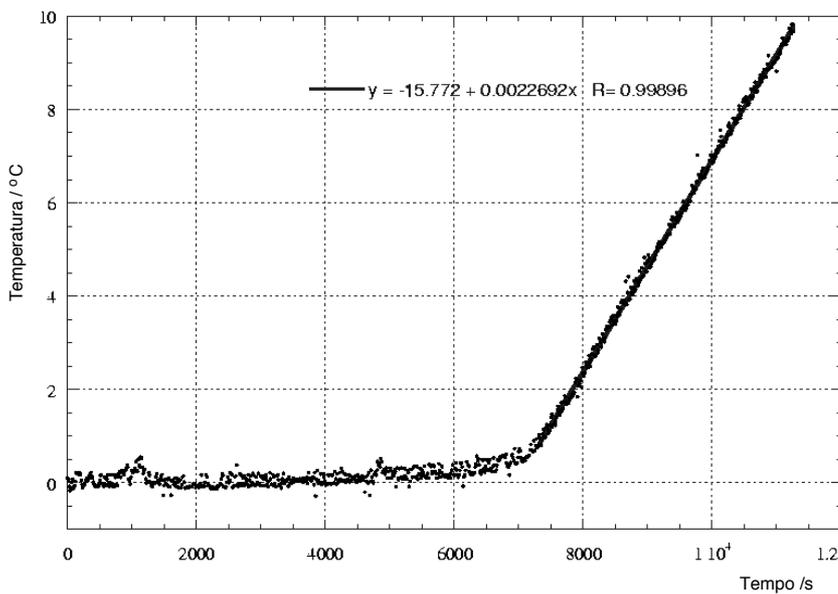


Figura 5.3: Resultados de uma experiência de aquecimento de uma mistura de água e gelo.

Este fenómeno está ilustrado na Fig. 5.3 que mostra os resulta-

▷ Actividade 5.2

dos de uma experiência em que se imergiu uma resistência numa garrafa térmica com água.

Durante esta experiência, a corrente foi $I = 0,49 \text{ A}$ e a ddp $V = 4,95 \text{ V}$. A potência dissipada na resistência foi, portanto, $P = 2,43 \text{ W}$. É visível o aumento de temperatura da água, na segunda parte da experiência. Mas a temperatura quase não variou durante cerca de duas horas (7000 s). O que se passou, alguém se esqueceu de ligar a corrente?

De facto a potência acima referida foi fornecida durante toda a duração do registo de temperaturas. Só que a garrafa térmica continha inicialmente uma mistura de água e gelo. Enquanto o gelo não fundiu, a temperatura manteve-se próxima de 0°C .

Assim, a energia total fornecida nesta experiência pode ser dividida em duas partes:

- nos primeiros 7000 s , originou a transformação de gelo em água líquida;
- depois disso originou o aumento de temperatura da água;

Da análise desta experiência (feita na Actividade 5.2) podemos então calcular em joule as seguintes grandezas:

- **O calor de fusão do gelo.**

A energia fornecida nos primeiros 7000 s foi de

$$P \times 7 \times 10^3 = 1,70 \times 10^4 \text{ J.}$$

Esta energia resultou na fusão de 54 g de gelo. O calor de fusão do gelo por unidade de massa é:

$$e_F = 3,15 \times 10^5 \text{ J kg}^{-1}. \quad (5.3)$$

- **A capacidade térmica mássica da água líquida.**

Como sabemos a energia em joule fornecida no aquecimento e a respectiva variação de temperatura, podemos escrever:

$$c_a m \Delta T = P \Delta t \quad (5.4)$$

em que Δt é o intervalo de tempo durante o qual a temperatura varia de ΔT . Logo

$$c_a = \frac{P}{m} \times \frac{\Delta t}{\Delta T}. \quad (5.5)$$

Os valores de Δt e ΔT podem ser calculados usando dois pontos na recta de aquecimento obtidos do gráfico. Este procedimento é seguido na Actividade 5.2 e permite o cálculo de c_a em J kg K^{-1} .

A nossa definição de caloria significa que $c_a = 1 \text{ cal g K}^{-1}$. Comparando com o valor obtido na Actividade 5.2, podemos calcular o valor da caloria em joule. O valor actualmente aceite é

$$1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$$

(ver Caixa 5.2).

Na Actividade A12 medimos também o calor de fusão do gelo em cal g^{-1} . O resultado da Eq. 5.3 permite-nos outra estimativa independente da relação entre o joule e a caloria.

▷ Problema 5.1

5.2.1 O joule e a caloria

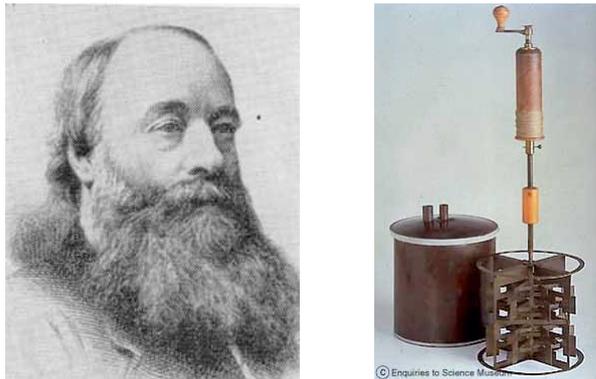


Figura 5.4: James Prescott Joule, (1818-1889). Físico inglês, nascido em Manchester, foi pupilo do químico John Dalton. A sua experiência de aquecimento de água com uma roda de pás accionada por pesos (aparelho à direita), foi um contributo fundamental para a clarificação do conceito de calor. Esta experiência permitiu-lhe determinar a relação entre caloria e a unidade de energia mecânica (que recebeu o seu nome), o **joule**. Joule descobriu também a expressão que exprime a energia dissipada numa resistência que escreveu na forma $P = RI^2$ (efeito de Joule). [2]

A discussão anterior mostra claramente que **joule** e **caloria** são unidades diferentes da mesma grandeza: energia. Tal como nós, os físicos aprenderam primeiro a defini-las de modos independentes e durante muito tempo não conheciam a relação entre elas. Na realidade, nem sabiam que estavam a lidar com a mesma grandeza. Por

um lado tinham os fenômenos mecânicos com movimentos, forças etc. Por outro, sem aparente relação, os fenômenos térmicos, com variações de temperatura e produção de *calor*. Calor foi durante muito tempo visto como uma substância especial, o *calórico*, envolvida em fenômenos de aquecimento. A caloria era considerada uma medição da quantidade de calor.

Em 1795 Benjamin Thompson, na qualidade ministro da Guerra e da Polícia na Baviera, tinha como tarefa supervisionar o fabrico de canhões. Impressionou-o a *quantidade de calor*, aparentemente inesgotável, produzida durante o processo de polimento do interior dos tubos dos canhões. Foi a primeira observação da relação entre a realização de trabalho por forças dissipativas e um aumento de temperatura.

5.2.1.1 Experiência de Joule

Nos meados do século XIX, o físico inglês James Prescott Joule realizou uma experiência semelhante à que fizemos com a varinha mágica na Actividade A9. Aqueceu (aumentou a temperatura) água com uma roda de pás movida por pesos que, ao caírem no campo gravítico, giravam a roda através de um sistema de roldanas. A Fig. 5.5 mostra uma reprodução do desenho do aparelho pela mão do próprio Joule.

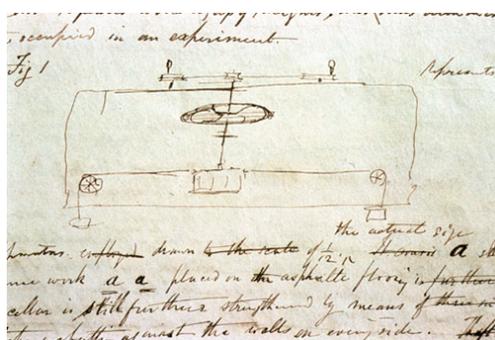


Figura 5.5: Um reprodução do caderno de notas de Joule com um esquema do seu aparelho (Manchester Museum of Science and Industry, UMIST collection).

Joule sabia calcular o trabalho realizado pelas forças do peso. Quando uma massa m cai de uma altura h , o trabalho realizado pelo peso é

$$w = mgh.$$

Este trabalho não aparecia como aumento de energia cinética da massa, porque a queda accionava as pás imersas em água; a massa caía muito lentamente. Joule raciocinou que esta energia era transferida para a água e resultava no respectivo aquecimento. Medindo a variação de temperatura da água, pode relacionar a caloria (na altura vista como unidade de quantidade de calor) com a unidade de trabalho. O valor que encontrou foi de

$$1 \text{ cal} = 4,15 \text{ J}.$$

Ainda hoje a experiência de Joule é referida como ilustrando a transformação de trabalho em calor. Esta afirmação pode induzir em erro. Na realidade trata-se de realizar trabalho e obter um aumento de temperatura. A energia num sistema não é trabalho, nem calor. Pode estar associada a movimento (energia cinética), posição (energia potencial) ou manifestar-se como um aumento de temperatura ou uma mudança de estado. Isto é, uma variação de energia de um sistema pode escrever-se como

$$\Delta E = \Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U \quad (5.6)$$

em que o último termo, designado por energia interna, inclui toda a energia associada a processos que não se manifestam em movimentos macroscópicos do corpo. Nos exemplos que vimos até aqui a variação de energia interna pode manifestar-se numa variação de temperatura ou numa mudança de estado físico.

Mas então o que é o calor? Se não é correcto identificar calor com energia interna, o que é então calor?

5.3 Calor

Enchemos um copo com água gelada do frigorífico e deixámo-lo no meio da sala. Passado meia-hora a água estava tépida.

É óbvio que passou energia do exterior do copo para a água: a temperatura da água subiu. Mas não houve deslocamentos, forças, não houve correntes eléctricas e diferenças de potencial, não houve *trabalho* realizado sobre o sistema. Poderíamos, como já vimos, conseguir a mesma variação de estado da água realizando trabalho. Por isso sabemos que a água tépida tem uma energia superior à da água gelada. Mas no caso presente não houve trabalho, nem eléctrico, nem mecânico nem de nenhum outro tipo. Os processos de transferência de energia na ausência de qualquer espécie de trabalho são designados, genericamente, como *calor*.

■ Quanto vale a caloria ■

A unidade de energia do Sistema Internacional é o joule, não a caloria. No entanto, esta unidade continua a ser muito usada, sobretudo por químicos, fisiologistas e nutricionistas. Mas não existe uma definição universalmente aceite. A definição que demos,

energia necessária para elevar a temperatura de 1 g de água de 1 °C,

tem uma ambiguidade: esta quantidade de energia depende da temperatura inicial da água. Não é exactamente igual entre 0 °C e 1 °C e 50 °C e 51 °C, por exemplo, embora os valores sejam muito próximos. Por outras palavras, a capacidade térmica mássica da água líquida tem uma pequena variação com a temperatura. Uma das definições, **caloria** 15 °C, abreviada como cal_{15} , é

energia necessária para elevar a temperatura de 1 g de água de 14,5 °C para 15,5 °C

e vale

$$1 \text{ cal}_{15} = 4,1855 \text{ J.}$$

Outra definição possível é a de **caloria média**:

1/100 da energia necessária para elevar a temperatura de 1 g de água de 0 °C a 100 °C.

O valor quase igual ao da cal_{15} (menos de 1% de diferença). Os químicos usam ainda uma **caloria termoquímica** definida, exactamente, como

$$1 \text{ cal}_{\text{th}} = 4,184 \text{ J.}$$

Durante muito tempo, os fisiologistas e nutricionistas chamaram Caloria (com “C” maiúsculo) o que é efectivamente uma quilo-caloria $1 \text{ Cal} = 1000 \text{ cal}$. Essa prática caiu em desuso, como se pode ver consultando a informação nutricional de um pacote de cereais.

Para os nossos efeitos, não há qualquer problema em ignorar toda esta complicação e tomar:

$$1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J.}$$

Caixa 5.2: A unidade caloria [1]

O que houve então foi transferência de energia como calor (não como trabalho) entre o ambiente e a água do copo. De facto, muitas das experiências que temos feito envolvem calor.

- Quando mergulhamos um cilindro de cobre quente em água fria (Actividade A11), o *processo* de transferência de energia entre o cobre e a água é calor;
- Quando colocamos um gobelé com água num disco quente, a energia passa pelo vidro para a água como calor, não como trabalho;
- Quando seguramos na ponta de uma barra metálica e aproximamos a outra ponta de uma chama, a temperatura na nossa extremidade aumenta. A energia é transferida de uma ponta à outra como calor;

Estes exemplos mostram claramente que o conceito de calor está associado a um *processo*, exactamente como o conceito de trabalho. Podemos aumentar a temperatura da água usando um processo que envolve calor. Mas podemos conseguir exactamente a mesma transformação com trabalho. Num sistema em equilíbrio, que não está a sofrer transformações, não há calor nem há trabalho: há energia!

5.4 Primeira lei da termodinâmica

Este é um bom momento para enunciarmos a primeira lei da termodinâmica. Aqui vai:

■ Primeira lei da Termodinâmica ■

Numa transformação entre dois estados de equilíbrio a variação de energia interna de um sistema ΔU é a soma do trabalho W realizado *sobre* o sistema com calor transferido *para* o mesmo, Q

$$\Delta U = W + Q \quad (5.7)$$

Muitas das ideias resumidas por este enunciado já foram abordadas. Mesmo assim, são necessários alguns comentários.

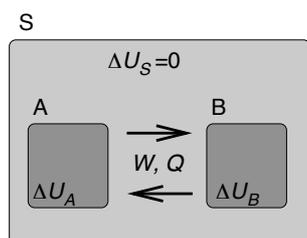


Figura 5.6: Se A e B trocam calor, Q , e trabalho, W , apenas entre si, a energia do sistema S não varia.

- a) O primeiro membro da equação só inclui energia interna porque é habitual, em termodinâmica, considerar apenas estados de equilíbrio, em que os termos de energia cinética e de energia potencial de translação não variam (sistemas globalmente em repouso)².
- b) Trabalho e calor são, como vimos, *processos* de transferir energia entre o exterior e o sistema que estamos a considerar. A primeira lei afirma que a soma $W+Q$ é independente do processo de passagem entre dois estados de equilíbrio dados. É sempre a mesma, se os estados forem os mesmos, pois é igual à diferença de energia, ΔU , entre os dois estados. Neste sentido, a primeira lei é, no essencial, a afirmação da existência de uma propriedade do estado de um sistema, a energia, que só varia quando há processos de trabalho e/ou calor com o exterior do sistema.
- c) A primeira lei é universal. Aplica-se a qualquer sistema físico. Suponhamos uma transformação em que dois sistemas A e B interagem apenas entre si. As respectivas energias variam, pois há processos de trabalho e calor entre estes sistemas. Mas a primeira lei aplica-se também ao sistema S composto por A e B . O trabalho e o calor trocados com o exterior do sistema S são nulos, pois só houve interacção entre A e B ; o sistema S (A e B) diz-se *isolado*. A aplicação da primeira lei a S dá:

$$\Delta U_S = 0.$$

Por outro lado $\Delta U_S = \Delta U_A + \Delta U_B$; recuperámos a lei de conservação de energia:

$$\Delta U_A + \Delta U_B = 0.$$

A primeira lei só faz sentido se soubermos calcular, para diferentes processos, W e Q . Se não os soubermos calcular, como podemos verificar que a respectiva soma é constante para transformações entre o mesmo par de estados? Já vimos vários exemplos de cálculo de W , o trabalho. Vamos agora olhar para Q , o calor, com mais pormenor.

²Muitos argumentam, com razão, que *termostática* seria um nome mais apropriado. Mas as tradições também pesam em Ciência.

5.5 Como é que a energia se transfere como calor?

Na secção anterior, tivemos o cuidado de identificar calor como um processo de transferência de energia. Por isso o título desta secção não foi, como é habitual na maior parte dos textos, “como se transfere calor?” Mas é preciso ter a noção que é uso comum, mesmo em bons textos de física, falar em transferência de calor, ceder calor, receber calor, transformar trabalho em calor, etc.. Esta linguagem não é, certamente, a mais feliz e é susceptível de sugerir que o calor é uma determinada forma de energia, que pode *estar* num sistema e passar para outro. Mas está de tal maneira consagrada que não pode ser evitada. E também não causa grande dano, se mantivermos uma ideia clara de que, quando falamos de “transferência de calor”, estamos apenas a ser preguiçosos para não dizer “transferência de energia como calor”. No que se segue, usaremos muitas vezes a linguagem corrente. Fica o aviso para não haver confusões.

É habitual identificar três tipos de processos de transferência de calor³:

a) **Condução.**

A energia pode ser transferida devido a interações entre as partículas constituintes da matéria (na forma gasosa, líquida ou sólida), sem que haja quaisquer movimentos perceptíveis macroscopicamente. Este tipo de processo chama-se condução.

b) **Convecção.**

Em líquidos e gases (fluidos) sujeitos à acção da gravidade, diferenças de temperatura entre diferentes zonas podem originar movimentos que misturam partes do fluido a diferentes temperaturas (correntes de convecção) e permitem a transferência de energia entre regiões do fluido: processo de convecção.

c) **Radiação.**

A transferência de energia é possível através da emissão e absorção de radiação electromagnética, que pode propagar-se em regiões com total ausência de matéria (no vazio).

³Transferências de energia na forma de calor, seria a forma correcta. Vamos habituando!

Vamos considerar em mais pormenor cada um destes processos. A condução e convecção serão discutidas neste capítulo; a radiação no próximo.

5.5.1 Condução

Diferenças de temperatura originam sempre transferências de calor. Falamos em condução de calor quando a energia é transferida através de um meio material em que existem regiões com diferentes temperaturas.

A propriedade que caracteriza a condução de calor em materiais é a condutividade térmica, designada, habitualmente, por κ . Podemos entender melhor o que é, considerando um exemplo concreto.

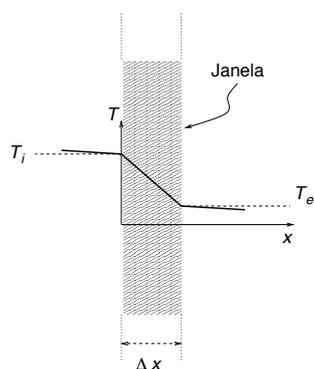


Figura 5.7: No interior do vidro de uma janela, a temperatura varia entre o valor da temperatura interior, T_i , e exterior, T_e .

5.5.1.1 Condução numa janela

É de noite. A temperatura exterior é de cerca de $T_e = 5^\circ\text{C}$. Dentro de casa, o aquecimento mantém uma agradável temperatura de $T_i = 21^\circ\text{C}$. Que quantidade de calor passa numa janela de vidro, de área $A = 0,80 \times 1,0\text{m}^2$?

A temperatura no interior do vidro (ver Fig. 5.7) varia entre as temperaturas das duas faces, interior e exterior, T_i e T_e . A quantidade de calor transferida por unidade de tempo, P_q , é tanto maior quanto mais rápida for a variação de temperatura T com a distância x na perpendicular ao plano da janela. Se estas temperaturas forem iguais, não haverá condução (equilíbrio térmico). P_q é proporcional ao declive, ou variação de temperatura por unidade de comprimento:

$$P_q \propto -\frac{T_e - T_i}{\Delta x} = -\frac{\Delta T}{\Delta x}$$

P_q é a quantidade de calor que passa no sentido positivo de xx e só é positivo se a temperatura diminuir com o aumento de x ; isto é, se $\Delta T \equiv T_e - T_i < 0$. Se a janela tivesse o dobro da espessura, a variação de temperatura T com x seria mais lenta e haveria menor passagem de calor na janela.

Por outro lado, P_q deverá ser proporcional à área da janela. Em cada uma de duas janelas iguais passará a mesma quantidade de calor. No conjunto das duas (dobro da área) passa o dobro da energia de cada uma.

Em resumo:

$$P_q \propto -A \frac{\Delta T}{\Delta x}.$$

5.5. COMO É QUE A ENERGIA SE TRANSFERE COMO CALOR? 23

A constante de proporcionalidade

$$P_q = -\kappa A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (5.8)$$

é, precisamente, a condutividade térmica do vidro, κ . A Eq. 5.8 traduz a lei de condução de calor num material de condutividade térmica κ . Consideremos um exemplo concreto.

Exemplo: suponhamos que a janela acima referenciada tem uma espessura de 0,3 cm. Teremos

$$P_q = -\kappa \times 0,80 \times \frac{5 - 21}{0,3 \times 10^{-2}} = \kappa \times 5,0 \times 10^3.$$

Para o vidro $\kappa = 0,80$ (SI) e

$$P_q = 4,0 \times 10^3 \text{ W}$$

P_q é uma energia por unidade de tempo, isto é, uma potência: a unidade SI é o **watt**. As unidades de κ , tiram-se da respectiva definição:

$$\kappa = 0,8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}.$$

À taxa mais baixa da EDP, 5,2 cêntimos por kWh em vazia, a janela “custa” mais de 20 cêntimos por hora!

Na realidade, esta estimativa está um pouco exagerada. Numa situação deste tipo a temperatura no interior, junto à janela, será mais baixa que no centro da sala. Mas, mesmo que a diferença de temperaturas entre as faces interior e exterior da janela seja um oitavo do valor calculado (apenas 2°C), ainda ficamos com uma potência de 0,5 kW de perda pela janela. E junto à janela estará bem pouco agradável ($T_i = 7^\circ\text{C}$).

5.5.1.2 Isolamento térmico

O exemplo anterior mostra a importância económica e ambiental⁴ do bom isolamento térmico. Os valores de condutividade térmica podem variar de várias ordens de grandeza entre diferentes materiais. Em geral, os metais têm condutividades térmicas elevadas. A tabela 5.1 inclui valores de alguns materiais, incluindo materiais usados em construção.

O baixo valor da condutividade térmica do ar pode surpreender. Como é possível aquecer uma sala eficazmente, se a condutividade térmica do ar é tão baixa? A resposta é: a gravidade ajuda!

⁴Menor necessidade de energia significa menos poluição (Actividade A3).

Material	Condutividade térmica, $\kappa / \text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
Prata	419
Cobre	385
Alumínio	201
Vidro	0,8
Betão	0,1
Madeira(castanho)	0,15
Lã de vidro	0,04
Cortiça em painel	0,05
Ar	0,024

Tabela 5.1: Condutividade térmica de alguns materiais. A do ar refere-se a condições normais de pressão e temperatura [3].

5.5.2 Convecção

A convecção é um fenómeno muito complexo, que envolve dois ingredientes:

- a) um fluido cuja massa volúmica depende da temperatura;
- b) um campo gravítico.

O ar, por exemplo, tem uma massa volúmica tanto menor quanto maior for a respectiva temperatura, para a mesma pressão. Por isso se diz correntemente: “o ar quente é mais leve”. Quando ligamos um aquecedor numa sala, aumentamos a temperatura do ar junto da resistência: a sua massa volúmica diminui. O resultado é que um volume de ar, em baixo, junto ao aquecedor, tem menor massa que o mesmo volume, em cima, junto ao tecto, onde o ar está mais frio.

É uma situação análoga a ter uma rolha de cortiça no fundo de um recipiente com água. O que acontece? A rolha sobe e, para o seu lugar, desce um volume igual de água, com massa volúmica maior. Neste processo o peso realiza um trabalho positivo, pois a massa que desce é superior à que sobe. Por isso é possível passar de uma situação de repouso para uma de movimento, com energia cinética não nula.

No ar acontece algo semelhante. O ar “quente” (temperatura superior e massa volúmica menor) sobe, e o ar “frio” (temperatura

■ **Demonstração de convecção para fazer em casa** ■

A seguinte experiência pode ser feita em casa, sem qualquer dificuldade, e ilustra a importância da convecção no funcionamento de uma chama. Requer apenas uma vela e fósforos.

Começa-se por acender uma vela. Fixa-se a vela verticalmente. Aproxima-se da chama a cabeça de um fósforo de duas maneiras:

- a. Directamente por cima da vela. Começa-se a uma distância razoável e vai-se descendo gradualmente até o fósforo acender.
- b. Aproximando a chama lateralmente.

O objectivo é comparar as distâncias a que se tem de chegar com a cabeça do fósforo, para que acenda, nas duas situações.

Caixa 5.3: A convecção e a chama de uma vela.

menor e massa volúmica maior) desce. Só que, neste caso, o ar, ao subir, entra em contacto com massas de ar a menor temperatura e arrefece. O ar que desce aquece em contacto com o aquecedor. O resultado é o estabelecimento de correntes contínuas de circulação de ar, chamadas correntes de convecção, que transportam o calor muito mais eficazmente que a condução. O valor de condutividade térmica da Tabela 5.1 diz respeito a ar em repouso.

Correntes de convecção são essenciais no funcionamento de uma chama. Se aproximarmos a mão da chama de uma vela por cima dela sentimos uma temperatura muito mais elevada do que lateralmente. O ar quente sobe segundo o eixo da vela e é substituído por ar frio pelo lados da mesma. É por isso que a chama de uma vela (zona tão quente que emite luz visível) parece flutuar acima do pavio (ver Caixa 5.3).

Numa janela de vidro duplo, as correntes de convecção são dificultadas pela pequena espessura da camada de ar entre as duas placas de vidro. O resultado é que a camada de ar entre os dois painéis de vidro oferece um excelente isolamento térmico, dada a baixa condutividade térmica do ar (comparada, por exemplo, com a do vidro).

A convecção é um processo físico de enorme importância no transporte de energia em líquidos e gases. No sistema climático da Terra, desempenha um papel fundamental (movimentos da atmos-

fera e oceanos). Mas importa recordar que só existe por causa do efeito da gravidade terrestre. Na ausência de peso, não há convecção.

5.6 Actividades, Questões e Problemas

5.6.1 Actividades

5.1. Proporcionalidade directa

Actividades destinadas a esclarecer o conceito de proporcionalidade directa e a sua tradução matemática. Ver ficha de Actividade A13.

5.2. Trabalho eléctrico e fusão do gelo

Análise dos resultados de uma experiência de aquecimento eléctrico de uma mistura de água e gelo. Ver Ficha de Actividade A14.

5.6.2 Questões

- 5.1. No texto designamos por **corpo negro** um corpo que tem emissividade $e(\lambda) = 1$ para todos os comprimentos de onda, λ . Isso significa que não difunde radiação. Imaginemo-nos a olhar para um tal corpo numa sala bem iluminada.
 - (a) Que cor tem o corpo se a sua temperatura for a temperatura ambiente?
 - (b) E se estiver a uma temperatura de 5000K?

5.6.3 Problemas

- 5.1. Na Actividade A12 determinou-se o valor do calor de fusão do gelo em cal g^{-1} . Comparando com o valor obtido na Actividade A14, determinar o valor de conversão de **joule** em **caloria**. Comparar com o valor obtido a partir da capacidade térmica da água líquida.
- 5.2. É feito um aquecimento de duas massas de gás iguais, inicialmente às mesmas pressão e temperatura, em duas situações distintas:
 - i) O gás está num recipiente de volume constante;

- ii) O gás está num cilindro com êmbolo móvel e expande-se à medida que a sua temperatura aumenta. A pressão é mantida igual à pressão atmosférica.

A mesma quantidade de energia é fornecida, nas duas situações, sob a forma de calor. No final do processo, qual das seguintes situações se verifica:

- (a) o gás a volume constante tem maior energia que o gás a pressão constante;
- (b) O gás a pressão constante tem maior energia que o gás a volume constante;
- (c) As duas massas de gás tem a mesma energia.

5.3. Imaginemos um frigorífico, com o seu compressor, fechado numa sala isolada do resto do mundo, trocando energia com ele apenas através da ligação eléctrica ao compressor.

- (a) Durante o funcionamento do frigorífico, este sistema recebe ou cede energia ao resto do mundo? A respectiva temperatura aumenta ou diminui?
- (b) Um homem viu-se de repente num casa muito fria, sem aquecimento e com um único aparelho a funcionar: o frigorífico. Foi à cozinha e abriu a porta do frigorífico, pondo o compressor a trabalhar permanentemente. É louco ou sabe física?

5.4. Numa casa há uma sala com: 4 janelas de dimensões $80 \times 107 \text{ cm}^2$; 4 janelas de dimensões $70 \times 185 \text{ cm}^2$. Estas janelas têm painéis de vidro simples de espessura 3 mm .

- (a) Para uma diferença de temperatura de 5°C entre as faces exterior e interior das janelas, qual é a potência transmitida por condução através destas janelas?
- (b) Se as janelas fossem duplas teriam uma camada de ar de espessura 3 mm entre os dois painéis de vidro. Se a diferença de temperatura entre o interior e exterior da camada de ar fosse também de 5°C , qual seria a potência transmitida por condução através da janela? (usar os valores de κ da Tabela 5.1 da página 24).

Bibliografia

- [1] Sizes. URL: <http://www.sizes.com/units/calorie.htm>,
Dezembro 2003.
- [2] National Museum of Science and Industry. Joule's paddle-
wheel apparatus. URL: [http://www.sciencemuseum.org.uk/
collections/treasures/joules.asp](http://www.sciencemuseum.org.uk/collections/treasures/joules.asp).
- [3] R. M. Tennent, editor. *Science Data Book*. Oliver & Boyd,
1971.